

磁共振成像在直肠癌中的应用进展

刘 鹏, 彭小娟, 王小琦

(甘肃省肿瘤医院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:结直肠癌是人类最常见的恶性肿瘤之一,其发病率、死亡率均较高,直肠癌约占 1/3。直肠癌的治疗以手术为主,术前进行准确的分期是制定合理治疗方案的关键。在众多的术前检查方法中,磁共振成像是非常重要的检查。随着磁共振技术的发展,出现了高分辨率扫描、扩散加权成像、灌注加权成像等新技术,如何更好地利用这些技术对直肠癌做出更加准确的分期判断,仍是研究的热点和重点。全文就磁共振高分辨率扫描、扩散加权成像及灌注加权成像等技术在直肠癌中的应用进展进行综述。

关键词:磁共振成像;直肠肿瘤;分期

中图分类号:R735.3⁺7 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-170X(2018)12-1210-06

doi:10.11735/j.issn.1671-170X.2018.12.B014

Research Progress of MRI in Rectal Cancer

LIU Peng, PENG Xiao-juan, WANG Xiao-qi

(Gansu Provincial Cancer Hospital, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Colorectal cancer is one of the most common malignant tumors with high incidence and mortality rate; and the rectal cancer accounts for about one third of colorectal cancer. The surgical operation is the main treatment for rectal cancer, and the accurate preoperative staging is critical for the treatment plan, in which MRI is most important. A variety of new techniques of MRI, including high resolution MRI (HR-MRI), diffusion weighted imaging (DWI) and perfusion weighted imaging (PWI) are available now. The application of these new techniques to improve the accuracy of preoperative staging of rectal cancer is the hotspot of research currently. In this review, the research progress of HR-MRI, DWI and PWI in rectal cancer is discussed.

Subject words: MRI; rectal cancer; staging

结直肠癌是人类最常见的恶性肿瘤之一,发病率在男性中位居第3位、女性中位居第2位,澳大利亚/新西兰、欧洲和北美发病率最高,非洲和中南亚发病率较低,在全球大部分地区男性发病率高于女性^[1]。美国癌症协会统计数据显示,癌症最常见的死亡原因中结直肠癌仅次于肺癌、乳腺癌和前列腺癌^[2]。结直肠癌中直肠癌大约占近 1/3,随着人们生活水平的提高、饮食结构的改变,直肠癌的发病率呈增高趋势。直肠癌治疗以手术为主,辅以化疗、放疗。根据肿瘤的病理分型、分期等,手术方式及术前术后采用的辅助放化疗方案有所不同^[3]。直肠癌患者术前分期

评估可为肿瘤临床分期提供重要依据,准确的临床分期是合理制定治疗方案的关键,术前临床分期不足或过度分期都会影响治疗。因此,必须对直肠癌患者进行准确的术前分期评估。

在众多术前检查中,磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)因为其软组织分辨率高、多方位成像、多参数成像等优点成为直肠癌术前分期评估的重要检查方法。最新《NCCN 结直肠癌诊治指南》在术前评估中新增标注盆腔 MRI 增强检查为“首选”推荐^[4]。MRI 基于形态学和解剖结构可以对直肠癌进行全面的术前评估,可总结为“DISTANCE”,DIS 即肿瘤的位置,“T”即 T 分期,“A”即肛门复合体,“N”即 N 分期,“C”即环周切缘,“E”即壁外血管受累^[5]。本文就 MRI 相关技术在直肠癌中的应用进行综述。

基金项目:甘肃卫生行业科研计划资助项目(GSWSKY2016-08)

通讯作者:王小琦,主任,主任医师,教授,硕士生导师,硕士;甘肃省肿瘤医院放射科,甘肃省兰州市七里河区小西湖东街2号(730050);E-mail:13669399957@163.com

收稿日期:2017-09-15; **修回日期:**2017-12-07

1 磁共振高分辨率扫描在直肠癌中的应用

早期 MRI 研究中应用表面线圈,无法鉴别直肠壁各层结构,分期的准确性为 59%~88%^[6]。直肠内线圈可以提高空间分辨率,能鉴别直肠壁各层结构,T 分期准确率达到了 71%~91%^[7],但对进展期直肠癌作用有限,对于肿瘤体积较大、有梗阻和肠腔狭窄的患者检查效果较差,对直肠系膜、系膜筋膜及周围盆腔结构显示欠佳。相控阵线圈可鉴别直肠壁各层,也可评估病变周围盆腔内其他组织,其 T 分期准确率为 65%~86%,但无法准确区分 T₂ 期和 T₃ 期肿瘤^[8]。高分辨率扫描采用相控阵表面线圈、薄层和小扫描视野,可显示直肠壁的黏膜及黏膜下层、固有肌层、直肠系膜的结构,直肠系膜筋膜、肛门括约肌复合体受侵情况也可精确显示。Brown 等^[9]报道,直肠癌 MRI 高分辨率扫描 T 分期的准确率达 90% 以上。高分辨率 T₂WI 被认为是直肠癌 MRI 的标准扫描序列^[10],3T 场强下的 MRI 高分辨率扫描直肠癌的 T 分期准确率达 86%~95%^[11]。孙应实等^[12]报道直肠癌高分辨率 MRI 扫描 T 分期准确率达 83.7%。杨解宇等^[13]将高分辨率扫描与 DWI 结合,报道 T 分期准确率为 88%。对于直肠癌行新辅助治疗后肿瘤完全缓解的评估,高分辨率 MRI 扫描阴性预测值为 90.65%,能够较好地检出有肿瘤残余的患者^[14]。磁共振高分辨率 T₂WI 对直肠癌术前 T 分期的一致性、准确率、敏感性、特异性均较常规 T₂WI 高,对于术前判断直肠癌局部浸润范围具有较好的诊断价值,并能较好预测环周切缘的状态^[15]。磁共振高分辨率 T₂WI 序列已成为直肠癌术前分期评估不可缺少的序列,在此基础上可以结合其他成像技术进行更进一步的评价。

2 磁共振扩散加权成像在直肠癌中应用

扩散加权成像(DWI)是现在唯一无创的反映活体组织内水分子微观扩散运动的功能成像方法,揭示了活体组织内水分子的随机运动。体外容器中的水分子是没有限制的自由扩散,而生物组织中水分子受到细胞膜和大分子的影响和限制,运动是受限的。生物组织内水分子扩散受限制的程度与组织细胞构成和细胞膜的完整性呈负相关。肿瘤组织通常

比正常组织拥有更多的细胞,所以在 DWI 上表现为扩散受限。1950 年,Hahn 首先描述了 MR 信号的扩散效应。1965 年,Stejskal 和 Tanner 首先使用脉冲梯度进行扩散加权成像^[16]。1988 年,Le Bihan 等^[17]首先将 DWI 引入活体组织。DWI 除应用于评估颅内疾病外,在体部成像研究中已经显示出探测早期的出现于传统影像可识别表现之前的能力。

磁共振 DWI 对水分子运动的敏感程度可以通过调整敏感因子(b 值)进行改变,随着 b 值增大,图像的扩散权重增大,DWI 的敏感性增加,但高 b 值会降低图像的信噪比。直肠癌磁共振 DWI 时,为了较好的显示肿瘤组织扩散受限程度,通常需要选择合适的 b 值。Ichikawa 等^[18]研究表明高 b 值 DWI 对直肠癌诊断的敏感性、特异性高,肿瘤为明显高信号,正常的肠壁、粪块及周围组织为低信号,对比度增加。Boone 等^[19]研究认为 1000s/mm² 是直肠癌扩散成像应用的较佳 b 值,可有效克服灌注、T₂ 穿透效应的影响。高永伟等^[20]通过对不同 b 值的比较,得出 DWI 成像的 b 值为 1200s/mm² 或 1500s/mm² 时对直肠癌敏感性高,T₂ 穿透效应降低,图像信噪比及对比度好。朱芸等^[21]得出 b 值为 800s/mm² 或 1000s/mm² 时图像质量较好。

测量组织的扩散系数值(diffusion coefficient, DC)可对 DWI 信号进行量化分析,但因 DC 值易受毛细血管灌注、体液流动、细胞渗透性及呼吸、血管搏动、肠道蠕动等生理活动的影响,实际工作中常采用表观扩散系数值(apparent diffusion coefficient, ADC)来代替 DC 值。ADC 值反映组织的扩散受限程度,消除了 T₂ 效应的影响。ADC 值与 eADC 值(exponential apparent diffusion coefficient, eADC)之间互为负指数关系,为定量反映水分子扩散运动能力的常用指标。ADC 值的产生至少需要 2 个不同 b 值的 DWI 数据,两个 b 值相差越大,测得的 ADC 值越准确。张文娟等^[22]研究认为,ADC 值可用于提示直肠癌的侵袭性和预后,以 $0.924 \times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{s}$ 为阈值时,灵敏度为 80%,特异度为 59%。沈璐等^[23]研究认为不同 T 分期的患者 ADC 值有显著差异,淋巴结外肿瘤种植阳性患者 ADC 值明显低于阴性患者,术前 CA19-9 $\geq 35 \text{U/ml}$ 的患者 ADC 值明显低于 CA19-9 $< 35 \text{U/ml}$ 的患者,随着肿瘤分化程度降低 ADC 值呈降低趋势。Kremser 等^[24]研究表明放疗过程中 ADC

值的变化趋势可能有助于早期评价直肠癌术前联合放化疗的疗效。

传统 DWI 的 ADC 值不能完全反映组织的扩散受限情况,毛细血管内血液微循环所致的“假扩散”也对 ADC 值有一定影响。1986 年 Le Bihan 等^[25]提出了体素内不相干运动 (intravoxel incoherent motion, IVIM) 的概念,IVIM 能够无创的分离组织内纯水分子的扩散运动和毛细血管微循环灌注的影响。IVIM-DWI 采用多个 b 值进行扫描成像,使用双指数模型拟合数据,得到 D、D* 和 f 三个定量参数。其中 D 代表纯水分子的扩散,即真性扩散系数;D* 受血流速度及毛细血管形态的影响并与毛细血管微循环灌注有关,即假性扩散系数;f 为灌注分数,是与微循环灌注相关的扩散占总扩散的比;D* 和 f 值都是反映组织的灌注信息。邱麟等^[26]研究结果显示直肠癌的 D、D*、f 和 ADC 值均低于正常直肠壁,且 D、f 和 ADC 值的差异有统计学意义。孟闫凯等^[27]研究直肠癌 IVIM-DWI 高 b 值变化对参数测量的可重复性影响不明显, $b > 1500 \text{ s/mm}^2$ 的选取价值有待进一步研究。

磁共振背景信号抑制全身扩散加权成像 (MR-DWIBS) 是在 DWI 的基础上,联合短时反转恢复序列与平面回波成像序列,利用 3D 最大信号强度投影技术,同时结合背景信号抑制与图像黑白反转技术,使肿瘤组织能够更清晰地显示,又被称为“类 PET”技术。DWIBS 克服了传统 DWI 的局限性,同时背景信号抑制更为彻底,对病灶的检出敏感性更高。

3 磁共振扩散峰度成像在直肠癌中的应用

扩散峰度成像 (diffusional kurtosis imaging, DKI)、扩散张量成像 (diffusional tensor imaging, DTI) 都是基于 DWI 无创性反映活体组织内水分子的扩散运动。DWI 及 DTI 的理论前提是水分子扩散呈正态分布,但大部分组织实际上并非如此。DKI 是在 DTI 技术上的延伸,避免了对水分子扩散的正态假设,提供了一个值用来量化真实水分子扩散位移与理想的非受限高斯分布扩散位移的偏离大小,以体现水分子扩散受限程度以及扩散的不均质性^[28]。通过 DKI,可得到平均峰度 (mean kurtosis, MK) 和平均表观扩散系数 (mean diffusion, MD),MK 是相同方向

扩散峰度的估计值,MD 是与扩散敏感梯度平行方向的扩散系数估计值。Falangola 等^[29]的研究报道 DKI 较 DTI 能更好地反映脑灰质结构的随年龄的复杂变化,更利于显示神经细胞数量组织结构分布的细微改变。曹喜生等^[30]研究得出 DKI 在直肠应用的可重复性较高,MD 值及 MK 值相关系数分别为 0.962、0.958,变异系数分别为 17.8%、18.9%;肿瘤和正常肠壁、肿瘤与炎症、中分化腺癌与黏液腺癌间 MD 值、MK 值差异有统计学意义;以 MD 值 $\leq 1.446 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$ 作为诊断直肠癌的阈值时,其诊断的敏感性为 92%,特异度为 79%;以 MK 值 ≥ 0.908 作为诊断直肠癌的阈值时,敏感性为 83%,特异度为 68%。

4 磁共振灌注加权成像在直肠癌中的应用

磁共振灌注加权成像 (perfusion weighted imaging, PWI) 是指将组织毛细血管水平的血流灌注通过 MRI 方式显示出来。根据成像原理 PWI 可分为对比剂首过法和动脉自旋标记法。对比剂首过法由于引入了磁共振对比剂,所以也称作动态对比增强磁共振成像 (dynamic contrast-enhanced MRI, DCE-MRI),包括两种方法:一种是 T_2^* 的技术,一种是 T_1 WI 灌注成像,目前直肠癌的 PWI 研究均采用 T_1 WI 灌注成像的方法。

T_1 WI 灌注成像通过采集对比剂注射前、注射过程中、注射后的一系列组织磁共振信号变化的信息,经过计算机后处理得到起始强化时间、对比增强率、最大增强率、最大对比增强率、达峰时间等半定量参数。时间-信号强度曲线 (time of intensity curve, TIC) 是病变血流灌注和流出等多种因素的综合反映。根据病变强化峰值出现的早晚及对比剂退出的情况,将 TIC 大致分为 3 种类型:Ⅰ型为持续型,多预示良性病变的可能性大;Ⅱ型为平台型,良恶性均可出现;Ⅲ型为流出型,多预示恶性病变的可能性大。Hong 等^[31]研究表明灌注成像半定量参数与直肠癌的病理分级、肿瘤血管生成中的微血管密度都有一定的相关性。

Tofts 等^[32]于 1991 年首先提出了二室灌注模型,并对相关参数进行了规范化命名。容积转移常数 (volume transfer constant, K_{trans})、速率常数 (rate constant, K_{ep})、细胞外间隙容积分数 (extravascular extra-

cellular space leakage space, V_e) 因能反映相关部位血管通透性及血流信息, 故对肿瘤的术前评估具有重要意义^[33]。DCE-MRI 的 T_1 WI 灌注成像技术近年来被广泛应用于乳腺等部位肿瘤微血管生成的研究中^[34]。在直肠病变方面, Vliegen 等^[35]研究增强扫描对判断病变浸润的程度意义不大, Wallengren 等^[36]研究则指出双重增强扫描分期更准确, Zhang 等^[37]报道 3D 动态增强对直肠癌 T 分期的准确率为 92.1%。

许多免疫组化指标反映了肿瘤的生物学行为及预后, 如微血管密度 (MVD)、血管内皮生长因子 (VEGF)、增殖细胞核抗原(PCNA)、富半胱氨酸蛋白-61 (Cyr-61)、基质金属蛋白酶-9 (MMP-9)、CD44v6、WWOX 蛋白及 nm23 基因等^[38]。Kim 等^[39]研究表明灌注成像定量参数 K_{trans} 、 V_e 与部分免疫组化指标存在相关性。

5 磁共振波谱及血氧水平依赖成像在直肠癌中的应用

磁共振波谱 (magnetic resonance spectroscopy, MRS) 是利用磁共振化学位移作用进行组织内特定化合物化学成分定量分析的方法。MRS 多用于脑组织、前列腺等, 在直肠病变中应用较少。李旭红^[40]利用磁共振波谱仪的微量探头发现在 3.0~4.5 区间直肠癌组织标本与正常直肠组织标本有不同的峰值变化, 该区间代表的是乳酸、甘油酸、氨基酸类的物质, 提示癌组织的代谢明显高于正常组织。血氧水平依赖 (blood-oxygen level dependent, BOLD) 是动态地反映组织内氧代谢情况和血液动力学变化的成像技术。目前已广泛应用于中枢神经系统, 在直肠病变中应用较少。杨春静^[41]通过研究提示直肠癌 BOLD 成像可为常规扫描判断直肠癌临床分期提供关于肿瘤氧代谢的信息, 对反映直肠癌的血管生成情况及判断肿瘤侵袭力有一定价值。

6 磁共振其它成像技术在直肠癌中的应用

三维可变反转角快速自旋回波 (3D-SPACE) 技术为 TSE 序列的一种变异, 相对于二维 TSE 序列

3D-SPACE 具有真正的高分辨率、高信噪比和高采集率的特点, 还支持任意平面重建^[42]。孙轶群等^[43]研究报道采用 3D-SPACE 技术的 T_2 WI 序列对直肠癌 T_1 、 T_2 分期的准确率高于高分辨率 T_2 WI 序列, 对早期直肠癌的诊断有优势。

袁维军等^[44]利用磁共振减影技术对直肠癌的术前分期进行了研究, 在增强前后分别对同一部位进行 T_1 WI 扫描, 然后将两次扫描的图像进行减影处理, 生成新的一组图像, 避免了肠道准备痛苦, 直肠黏膜层突出显示, 对 T_3 、 T_4 期的判断相对准确, 分别达 97.3%、80.0%。

Dixon 技术是指分别采集水和脂肪质子的同相位和反相位两种回波信号, 通过运算得到同相位图、反相位图、水质子图和脂质子图, 也称作水脂分离技术。宋立涛等^[45]利用 Dixon 增强序列对直肠癌的术前分期进行研究, 水脂分离序列可提高图像信噪比, 脂质子图有助于提高 N 分期诊断准确性。

7 小结与展望

在对直肠癌术前分期评估中, 从低场设备到更高场强设备, 从常规序列、高分辨率 T_2 WI 序列再到 3D-SPACE 序列, 从反映形态学变化到 DWI、PWI 等功能成像, MRI 检查在直肠癌的诊治方面起到举足轻重的作用。如何充分利用现有的 MRI 检查技术和开发新的技术, 更加准确和细致的反映直肠癌病变的特征, 为临床诊疗提供更加详尽的依据仍是我们不懈的追求, 还需要继续的深入研究。总之, MRI 检查在直肠癌诊疗中有着重要的价值及广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Torre LA, Bray F, Siegel RL, et al. Global cancer statistics, 2012[J]. CA Cancer J Clin, 2015, 65(2): 87-108.
- [2] Siegel RL, Miller KD, Jemal A. Cancer statistics, 2016 [J]. CA Cancer J Clin, 2016, 66(1): 7-30.
- [3] Simha V, Kapoor R, Gupta R, et al. Mucinous adenocarcinoma of the rectum: a poor candidate for neo-adjuvant chemoradiation? [J]. J Gastrointest Oncol, 2014, 5(4): 276-279.
- [4] Dai J, Qian Q. Interpretation of Updated NCCN Guidelines for Colon Cancer and Rectal Cancer (Version 1. 2017)[J]. Journal of Clinical Surgery, 2017, 25(4): 245-247. [戴静, 钱群. 2017.V1 版《NCCN 直肠癌诊治指南》更新解读[J]. 临床外科杂志, 2017, 25(4): 245-247.]

- [5] Nougaret S, Reinhold C, Mikhael HW, et al. The use of MR imaging in treatment planning for patients with rectal carcinoma; have you checked the "DISTANCE"? [J]. *Radiology*, 2013, 268(2): 330–344.
- [6] Cova M, Frezza F, Pozzi-Mucelli RS, et al. Computed tomography and magnetic resonance in the preoperative staging of the spread of rectal cancer; a correlation with the anatomicopathological aspects [J]. *Radiol Med*, 1994, 87(1–2): 82–89.
- [7] Maldjian C, Smith R, Kilger A, et al. Endorectal surface coil MR imaging as a staging technique for rectal carcinoma; a comparison study to rectal endosonography [J]. *Abdom Imaging*, 2000, 25(1): 75–80.
- [8] Gagliardi G, Bayar S, Smith R, et al. Preoperative staging of rectal cancer using magnetic resonance imaging with external phase-arrayed coils [J]. *Arch Surg*, 2002, 137(4): 447–451.
- [9] Brown G, Richards CJ, Newcombe RG, et al. Rectal carcinoma; thin-section MR imaging for staging in 28 patients [J]. *Radiology*, 1999, 211(1): 215–222.
- [10] Brown G, Daniels IR, Richardson C, et al. Techniques and trouble-shooting in high spatial resolution thin slice MRI for rectal cancer [J]. *Br J Radiol*, 2005, 78(927): 245–251.
- [11] Sani F, Foresti M, Parmiggiani A, et al. 3-T MRI with phased-array surface coil in the local staging of rectal cancer [J]. *Radiol Med*, 2011, 116(3): 375–388.
- [12] Sun YS, Li XT, Zhang XY, et al. Preoperative staging of rectal carcinoma with high-resolution MRI: correlation with histopathologic findings [J]. *Chin J Surg*, 2012, 50(3): 207–210. [孙应实, 李晓婷, 张晓燕, 等. 直肠癌高分辨率磁共振成像 T 分期与病理 T 分期的对照研究 [J]. *中华外科杂志*, 2012, 50(3): 207–210.]
- [13] Yang XY, Wang J, Lv XL, et al. A study on high-resolution MRI and double-contrast MRI combined with DWI in the preoperative local staging of rectal cancer [J]. *CT Theory and Applications*, 2017, 26(2): 195–202. [杨解宇, 王杰, 吕兴隆, 等. 高分辨 MRI 双重造影结合 DWI 对直肠癌术前分期的研究 [J]. *CT 理论应用与研究*, 2017, 26(2): 195–202.]
- [14] Zhang XY, Li XT, Shi YJ, et al. High resolution MR T₂WI combined with DWI on evaluation of pathological complete response after neoadjuvant therapy in rectal cancer [J]. *Chin J Interv Imaging*, 2017, 14(3): 164–168. [张晓燕, 李晓婷, 史燕杰, 等. 高分辨率 MR T₂WI 联合 DWI 评价直肠癌新辅助治疗后病理学完全缓解 [J]. *中国介入影像与治疗学*, 2017, 14(3): 164–168.]
- [15] Wu JK. High-Resolution MRI and diffusion-weighted imaging in pre-operation staging of primary rectal cancer [D]. Guangzhou: Southern Medical University, 2016. [吴俊铠. 高分辨率磁共振及扩散加权成像在原发性直肠癌术前分期中的临床应用 [D]. 广州: 南方医科大学, 2016.]
- [16] Stejskal EQ, Tanner JE. Spin diffusion measurements: Spin echoes in the presence of a time-dependent field gradient [J]. *J Chem Phys*, 1965, 42(1): 288–292.
- [17] Le Bihan D, Breton E, Lallemand D, et al. Separation of diffusion and perfusion in intravoxel incoherent motion MR imaging [J]. *Radiology*, 1988, 168(2): 497–505.
- [18] Ichikawa T, Erturk SM, Motosugi U, et al. High-B-value diffusion-weighted MRI in colorectal cancer [J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2006, 187(1): 181–184.
- [19] Boone D, Taylor SA, Halligan S. Diffusion weighted MRI: Overview and implications for rectal cancer management [J]. *Colorectal Dis*, 2013, 15(6): 655–661.
- [20] Gao YW, Niu GM, Han XD. Selection of appropriate b value of diffusion weighted imaging for diagnosis of rectal cancer using 3.0T magnetic resonance scanner [J]. *Clin J Med Offic*, 2012, 40(6): 1464–1467. [高永伟, 牛广明, 韩晓东. 3.0T 磁共振扩散加权成像诊断直肠癌最适 b 值的选取 [J]. *临床军医杂志*, 2012, 40(6): 1464–1467.]
- [21] Zhu Y, Zhang JX. Research progress in MRI and fMRI on rectal cancer [J]. *Chinese Journal of General Practice*, 2015, 15(10): 1844–1846. [朱芸, 张俊祥. 磁共振及功能成像在直肠癌中的研究进展 [J]. *中华全科医学*, 2015, 15(10): 1844–1846.]
- [22] Zhang WJ, Jiang J, Ye JJ, et al. Correlation between value of apparent diffusion coefficient of DWI and prognostic factors of rectal cancer [J]. *Chin J Med Imaging Technol*, 2013, 29(10): 1665–1669. [张文娟, 蒋健, 叶建军, 等. 扩散加权成像 ADC 值与直肠癌预后因素的相关性研究 [J]. *中国医学影像技术*, 2013, 29(10): 1665–1669.]
- [23] Shen L, Tang F, Lin Y, et al. Correlation between apparent diffusion coefficient and pathological pattern and prognostic factors of rectal cancer [J]. *Oncoradiology*, 2017, 26(1): 43–48. [沈璐, 唐菲, 林翌, 等. 3.0T 表观扩散系数与直肠癌病理分型及预后指标的相关性 [J]. *肿瘤影像学*, 2017, 26(1): 43–48.]
- [24] Kremser C, Judmaier W, Hein P, et al. Preliminary results on the influence of chemoradiation on apparent diffusion coefficients of primary rectal carcinoma measured by magnetic resonance imaging [J]. *Strahlenther Onkol*, 2003, 179: 641–649.
- [25] Le Bihan D, Breton E, Lallemand D, et al. MR imaging of

- intravoxel incoherent motions: application to diffusion and perfusion in neurologic disorders[J]. *Radiology*, 1986, 161(2): 401–407.
- [26] Qiu L, Cai XR, Liu SR, et al. 3.0T MR intravoxel incoherent motion diffusion weighted imaging preoperative diagnosis of rectal carcinoma [J]. *Chin J Med Imaging*, 2015, 31(9): 1349–1353. [邱麟, 蔡香然, 刘斯润, 等. 3.0T 磁共振体素内不相干运动扩散加权成像术前检查直肠癌[J]. *中国医学影像技术*, 2015, 31(9): 1349–1353.]
- [27] Meng YK, Zhang CD, Zhang HM, et al. Optimization of high B values for intravoxel incoherent motion imaging of rectal cancer: a pilot study [J]. *Journal of Clinical Radiology*, 2017, 36(6): 822–826. [孟闫凯, 张翀达, 张红梅, 等. 直肠癌磁共振体素内不相干运动成像高 b 值优化的初步研究[J]. *临床放射学杂志*, 2017, 36(6): 822–826.]
- [28] Jensen JH, Helpert JA, Ramani A, et al. Diffusional kurtosis imaging: the quantification of non-gaussian water diffusion by means of magnetic resonance imaging[J]. *Magnetic Resonance in Medicine*, 2005, 53(6): 1432–1440.
- [29] Falangola MF, Jensen JH, Babb JS, et al. Age-related non-gaussian diffusion patterns in the prefrontal brain[J]. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 2008, 28(6): 1345–1350.
- [30] Cao XS, Zheng X, Liu XY, et al. The reproducibility of diffusional kurtosis imaging for rectum in vivo [J]. *Chin Comput Med Imag*, 2015, 21(6): 524–527. [曹喜生, 郑祥, 刘向一, 等. 直肠磁共振弥散峰度成像可重复性评价[J]. *中国医学计算机成像杂志*, 2015, 21(6): 524–527.]
- [31] Hong HS, Kim SH, Park HJ, et al. Correlations of dynamic contrast-enhanced magnetic resonance imaging with morphologic, angiogenic, and molecular prognostic factors in rectal cancer[J]. *Yonsei Med J*, 2013, 54(1): 123–130.
- [32] Tofts PS, Brix G, Buckley DL, et al. Estimating kinetic parameters from dynamic contrast-enhanced T1-weighted MRI of a diffusable tracer: standardized quantities and symbols[J]. *J Magn Reson Imaging*, 1999, 10(3): 223–232.
- [33] Beaumont C, Pandey T, Gaines Fricke R, et al. MR evaluation of rectal cancer: current concepts [J]. *Curr Probl Diagn Radiol*, 2013, 42(3): 99–112.
- [34] Hylton N. Dynamic contrast-enhanced magnetic resonance imaging as an imaging biomarker [J]. *J Clin Oncol*, 2006, 24(20): 3293–3298.
- [35] Vliegen RF, Beets GL, von Meyenfeldt MF, et al. Rectal cancer, MR imaging in local staging is gadolinium-based contrast material helpful? [J]. *Radiology*, 2005, 234(1): 179–188.
- [36] Wallengren NO, Holtas S, Andren-sandberg A, et al. Rectal carcinoma: double-contrast MR imaging for preoperative staging [J]. *Radiology*, 2000, 215(1): 108–114.
- [37] Zhang XM, Zhang HL, Yu D, et al. 3-T MRI of rectal carcinoma: preoperative diagnosis, staging, and planning of sphincter-sparing surgery [J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2008, 190(5): 1271–1278.
- [38] Jeong D, Heo S, Sung Ahn T, et al. Cyt61 expression is associated with prognosis in patients with colorectal cancer [J]. *BMC Cancer*, 2014, 14: 164.
- [39] Kim YE, Lim JS, Choi J, et al. Perfusion parameters of dynamic contrast-enhanced magnetic resonance imaging in patients with rectal cancer: correlation with microvascular density and vascular endothelial growth factor expression [J]. *Korean J Radiol*, 2013, 14(6): 878–885.
- [40] Li XH. Research of ^1H and ^{13}C MRS on rectal tissue [J]. *Chinese Remedies & Clinics*, 2014, 14(6): 830–831. [李旭红. 直肠组织的 ^1H 和 ^{13}C MRS 谱研究[J]. *中国药物与临床*, 2014, 14(6): 830–831.]
- [41] Yang CJ. Correlation between BOLD imaging and angiogenesis, invasion of rectal cancer [D]. Shenyang: China Medical University, 2010. [杨春静. 磁共振直肠癌 BOLD 成像与肿瘤血管生成及侵袭性的相关性研究[D]. 沈阳: 中国医科大学, 2010.]
- [42] Morita S, Ueno E, Masukawa A, et al. Comparison of SPACE and 3D TSE MRCP at 1.5 T focusing on difference in echo spacing [J]. *Magn Reson Med Sci*, 2009, 8(3): 101–105.
- [43] Sun YQ, Tong T, Gu YJ, et al. Diagnostic value of MRI with 3D SPACE sequence in T staging of rectal cancer [J]. *Oncoradiology*, 2017, 26(1): 25–29. [孙轶群, 童彤, 顾雅佳, 等. 3D-SPACE 序列在直肠癌术前 T 分期中的诊断价值[J]. *肿瘤影像学*, 2017, 26(1): 25–29.]
- [44] Yuan WJ, Li P, Wang YM, et al. MRI subtraction technique combining DWI for colorectal cancer can study the clinical application of preoperative staging diagnosis [J]. *CT Theory and Applications*, 2014, 23(6): 1001–1009. [袁维军, 李平, 王燕梅, 等. MRI 减影技术结合 DWI 对直肠癌术前分期诊断的临床应用研究 [J]. *CT 理论与应用研究*, 2014, 23(6): 1001–1009.]
- [45] Song LT, Zhang H, Pan ZL, et al. Value of water-fat suppression technique with a 3.0T scanner for preoperative MRI staging of rectal cancer [J]. *Radiol Practice*, 2013, 28(10): 1049–1053. [宋立涛, 张欢, 潘自来, 等. 水脂分离增强序列在 3T 磁共振直肠癌术前分期中的应用[J]. *放射学实践*, 2013, 28(10): 1049–1053.]